



09/696,961

日本国特許庁  
PATENT OFFICE  
JAPANESE GOVERNMENT

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出願年月日  
Date of Application: 2000年10月20日

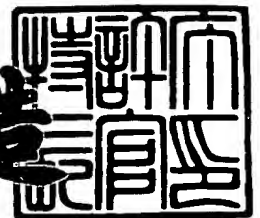
出願番号  
Application Number: 特願2000-321622

出願人  
Applicant (s): 株式会社豊田中央研究所

2001年 1月12日

特許庁長官  
Commissioner,  
Patent Office

及川耕造



出証番号 出証特2000-3111443

【書類名】 特許願

【整理番号】 TC1-0480

【提出日】 平成12年10月20日

【あて先】 特許庁長官殿

【国際特許分類】 G06F 17/00

【発明者】

    【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株  
                        式会社豊田中央研究所内

    【氏名】 西垣 英一

【発明者】

    【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株  
                        式会社豊田中央研究所内

    【氏名】 西脇 眞二

【発明者】

    【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株  
                        式会社豊田中央研究所内

    【氏名】 菊池 昇

【発明者】

    【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株  
                        式会社豊田中央研究所内

    【氏名】 鶴見 康昭

【特許出願人】

    【識別番号】 000003609

    【氏名又は名称】 株式会社豊田中央研究所

【代理人】

    【識別番号】 100075258

    【弁理士】

    【氏名又は名称】 吉田 研二

    【電話番号】 0422-21-2340

【選任した代理人】

【識別番号】 100081503

【弁理士】

【氏名又は名称】 金山 敏彦

【電話番号】 0422-21-2340

【選任した代理人】

【識別番号】 100096976

【弁理士】

【氏名又は名称】 石田 純

【電話番号】 0422-21-2340

【先の出願に基づく優先権主張】

【出願番号】 平成11年特許願第310338号

【出願日】 平成11年10月29日

【手数料の表示】

【予納台帳番号】 001753

【納付金額】 21,000円

【提出物件の目録】

【物件名】 明細書 1

【物件名】 図面 1

【物件名】 要約書 1

【包括委任状番号】 9105107

【ブルーフの要否】 要

【書類名】 明細書

【発明の名称】 構造物の設計方法及び記録媒体

【特許請求の範囲】

【請求項 1】 構造物の設計領域を複数の節点で分割し、隣接節点及び非隣接節点同士を梁要素で結合した設計モデルを設定し、前記設計モデルを最適化することを特徴とする構造物の設計方法。

【請求項 2】 請求項 1 記載の方法において、  
前記設計モデルに境界条件を与え、前記梁要素の剛性を修正することで前記最適化を行うことを特徴とする構造物の設計方法。

【請求項 3】 請求項 2 記載の方法において、  
前記境界条件は前記構造物に付加される外力、固定条件及び体積条件を含み、  
前記最適化は前記梁要素の実質的消失を含むことを特徴とする構造物の設計方法。

【請求項 4】 請求項 1 ～ 3 のいずれかに記載の方法において、  
前記梁要素の断面を 2 以上の設計変数で表現される形状とすることを特徴とする構造物の設計方法。

【請求項 5】 請求項 4 に記載の方法において、  
前記最適化計算において、前記断面の寸法およびその断面についての主軸の梁要素の座標系に対する角度を決定することを特徴とする構造物の設計方法。

【請求項 6】 構造物のモデルを設計するプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な媒体であって、前記プログラムはコンピュータに対して、少なくとも、

構造物の設計領域を複数の節点で分割させ、  
隣接節点及び非隣接節点同士を梁要素で結合させた設計モデルを作成させ、  
前記設計モデルを最適化させる  
ことを特徴とする記録媒体。

【請求項 7】 請求項 6 記載の記録媒体において、  
前記プログラムは、入力された境界条件に基づいて前記梁要素の剛性を修正させることで前記最適化を実行させる

ことを特徴とする記録媒体。

【請求項 8】 請求項 7 記載の記録媒体において、  
前記境界条件は前記構造物に付加される外力、固定条件及び体積制約を含み、  
前記最適化は前記梁要素の実質的消失を含む  
ことを特徴とする記録媒体。

【請求項 9】 請求項 6～8 のいずれかに記載の記録媒体において、  
前記梁要素の断面を 2 以上の設計変数で表現される形状とする  
ことを特徴とする記録媒体。

【請求項 10】 請求項 9 に記載の記録媒体において、  
前記最適化計算において、前記断面の寸法およびその断面についての主軸の梁  
要素の座標系に対する角度を決定する  
ことを特徴とする記録媒体。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は構造物の設計方法、特に初期設計段階で形（モデル）を生成する方法  
に関する。

【0002】

【従来の技術】

従来より、各種構造物の設計方法が提案されている。例えば、特開平 3－2 2  
4 0 6 3 号公報には、解析計算部とモデリング部との間にインターフェースを設  
け、解析結果から構造物の設計パラメータの変更と再モデリングを自動的に行い  
、反復計算の後に設計仕様を満たす最適モデルを出力する最適設計システムが開  
示されている。

【0003】

【発明が解決しようとする課題】

この従来技術では、反復計算の後に設計仕様を満たすように修正していくもの  
の、基準となる最初の形を生成する技術に関しては何ら言及していない。通常、  
個別の設計作業は設計者個人のノウハウや設計者の設計ノートに依存しているの

が現状であり、最初の形（解析の場合はモデル）を生成するための具体的ツールは未だ存在していない。最初の形が生成された後は、上述した従来技術や A I S I / C A R S と呼ばれる自動車の構造部材の設計援用プログラムなどを用いて設計することが可能である。

【 0 0 0 4 】

なお、解析については、詳細なメッシュモデルを扱う F E M 解析が主流化しているが、最初のモデルの完成度によりその後の収束性や計算時間が決定され、最初のモデルが不合理なものであれば計算時間が長くなるのみならず、設計変更の数が増え、そのたびにモデルの再作成時間を含めた計算時間が累積的に増大してしまう問題がある。

【 0 0 0 5 】

本発明は、上記従来技術の有する課題に鑑みなされたものであり、その目的は、初期設計段階で合理的な形を簡易かつ迅速に生成することができる構造物の設計方法を提供することにある。

【 0 0 0 6 】

【課題を解決するための手段】

上記目的を達成するために、本発明は、構造物の設計領域を複数の節点で分割し、隣接節点及び非隣接節点同士を梁要素で結合した設計モデルを設定し、前記設計モデルを最適化することを特徴とする。

【 0 0 0 7 】

また、前記設計モデルに境界条件を与え、前記梁要素の剛性を修正することで前記最適化を行うことを特徴とする。ここで、前記境界条件は前記構造物に付加される外力、固定条件及び体積条件を含み、前記最適化は前記梁要素の実質的消失を含むことが好適である。さらに、前記設計モデルの前記節点にパネルによる剛性寄与分を付加することで前記最適化を行うことが好適である。

【 0 0 0 8 】

本発明においては構造物の設計領域を複数の節点で分割する。そして、各節点同士を梁要素で結合する。設計領域を複数の節点で分割し、隣接節点同士をトラスで結合したグラウンドストラクチャモデルと称されるモデルは公知であるが（例

例えば、Optimizati n of Structural Topology Shape and Material : Martin Philip Bendsoe, Springer(1995)参照)、本発明においてはこのグランドストラクチャーのように隣接節点同士を接続するだけでなく、さらに非隣接節点同士をも結合し、また結合の方法もトラスではなく梁要素で結合する。非隣接節点同士をも結合することでより多岐にわたる形を生成することができる。また、本発明ではトラスではなく梁要素を用いて結合することで、より自由度の高い、所定の制約条件を満足する最適の形を生成することができる。隣接節点に関しては、全ての隣接節点同士を結合することが必要であるが、非隣接節点に関しては、必ずしも全ての非隣接節点に対して梁要素で結合する必要はない。但し、結合する非隣接節点が増大するほど、より精緻なモデルを生成することができる。

#### 【 0 0 0 9 】

節点と梁要素から構成される設計モデルを最適化する方法としては、例えば設計モデルに所定の境界条件を与え、梁要素の剛性を修正することで、最大剛性を得ることができる形を生成することができる。境界条件としては、外力と固定条件を付加し、一定の体積制約の下で変位が最小となるような最適化を行うことが考えられる。最適化は、梁要素の剛性の変更により行うが、剛性最大化に実質的に寄与しない梁要素に関しては実質的に消失させることで、所定の体積条件を満足することができる。実質的に消失とは、梁要素をデータ上直接消去する場合の他、データとしては存在しているが、梁要素の存在に影響するパラメータ（例えば断面積など）をゼロとして間接的に存在を消去する場合も含まれる。データ自体を消去する場合には計算に寄与するデータ数が増加するため計算が複雑となるが、実質的に消去することで計算の複雑化を抑制することができる。

#### 【 0 0 1 0 】

また、自動車ボディや住宅構造などの構造物を設計する際には、骨格構造に加えてパネルによる剛性寄与分が存在するため、節点と梁要素から成る設計モデルの節点にパネルによる剛性寄与分を付加することで、パネルなしの場合と同一アルゴリズムで最適化を行うことができる。

#### 【 0 0 1 1 】

また、前記梁要素の断面を2以上の設計変数で表現される形状とすることが好

適である。

【 0 0 1 2 】

設計変数を 2 にすることで、楕円断面や長方形断面を取り扱うことができ、3 以上とすることで、各種の複雑な断面形状を取り扱うことができるようになる。従って、最適化の段階で梁のレイアウトだけでなく、梁の断面設計も行える。

【 0 0 1 3 】

特に、前記最適化計算において、前記断面の寸法およびその断面についての主軸の梁要素の座標系に対する角度を決定することが好適である。

【 0 0 1 4 】

このように、梁要素の断面寸法だけでなく、断面の主軸方向（角度）を決定できるので、設計自由度が増し、より詳細に製品性能の向上が図れる。実際の機械部品に利用される梁構造は、ほとんど断面主軸を持つ。そこで、断面主軸方向を決定できることは、機械設計にとって、きわめて有効である。

【 0 0 1 5 】

また、本発明は、構造物のモデルを設計するプログラムを記録したコンピュータ読み取り可能な媒体を提供する。前記プログラムはコンピュータに対して、少なくとも、構造物の設計領域を複数の節点で分割させ、隣接節点及び非隣接節点同士を梁要素で結合させた設計モデルを作成させ、前記設計モデルを最適化させることを特徴とする。

【 0 0 1 6 】

前記プログラムは、入力された境界条件に基づいて前記梁要素の剛性を修正させることで前記最適化を実行させることが好適であり、前記境界条件は前記構造物に付加される外力、固定条件及び体積制約を含み、前記最適化は前記梁要素の実質的消失を含むことが好適である。

【 0 0 1 7 】

【発明の実施の形態】

以下、図面に基づき本発明の実施形態について説明する。なお、本実施形態の設計方法は、具体的にはパーソナルコンピュータやワークステーションなどのコンピュータに処理プログラムをインストールし、コンピュータ上で実行すること



ができる。本実施形態の設計モデルは、梁要素とパネル要素のような構造力学に基づいた要素を用いているため、大容量のメモリは不要であり、例えばパーソナルコンピュータ上で表計算ソフトウェアをフロントエンドとして用いることも可能である。なお、処理プログラムはCD-ROMやDVD、ハードディスク、半導体メモリなど、電磁氣的、光学的、あるいは化学的に情報を保持できる任意の媒体に記録することができる。処理プログラムのインストールは、例えばCD-ROMに処理プログラムを記録し、CD-ROMからコンピュータのハードディスクに処理プログラムを供給することで行うことができる。もちろん、当初からコンピュータのハードディスクあるいはROMに処理プログラムを記録させ、構造物モデル設計専用のコンピュータとして用いることも可能である。

#### 【 0 0 1 8 】

図1には、本実施形態における設計モデルが模式的に示されている。設計対象や解析対象（以下、「設計」には解析も含むものとする）の設計領域を多数の節点10で分割し、隣接節点同士を梁要素12で結合する。また、隣接節点同士だけでなく、非隣接節点同士も梁要素12で結合する。図1においては、全ての隣接節点同士を梁要素12で結合するとともに、全ての非隣接節点も梁要素12で結合している。全ての非隣接節点を梁要素12で結合することは必須ではないが、最適の初期設計形状を生成するためには梁要素12の数は多ければ多いほどよく（本実施形態では、最初から何らかの形を与えられているのではなく、形を与えられていない状態から最適の初期形状を生成していくため、梁要素が多いほど多様な形状を生成することができる）、したがって全ての非隣接節点同士を梁要素12で結合するのが好適である。

#### 【 0 0 1 9 】

このような設計モデルを設定し、次にこの設計モデルに対して境界条件を与え、最適化してゆく。

#### 【 0 0 2 0 】

図2には、図1の設計モデルをモデルを用いて構造物の剛性を最大化する場合の処理フローチャートが示されている。まず、初期値を入力する（S101）。この初期値の入力は、具体的には図1に示されたように設計領域を複数の節点1

0で分割するとともに節点10同士を梁要素12で結合し、境界条件を入力することを意味する。境界条件としては、外力の負荷や体積制約などがあり、本実施形態においては一例として図1において図中左側を拘束し、右側の中心部14に負荷を印加する場合について説明する。

## 【0021】

初期値を入力した後、次に構造物全体の剛性マトリクスKを作成する（S102）。設計モデルを複数の節点10と梁要素12で構成した場合、節点間の関係は力をベクトル $f$ 、変位ベクトルを $u$ 、剛性マトリクスを $K$ として一般に $f = Ku$ という形に表すことができる。この力と変位の関係を規定する式における $K$ が構造物の剛性マトリクスであり、次式で表される要素剛性マトリクス $K_e$ の重ね合わせにより表現される。

## 【0022】

【数 1】

$$\begin{array}{c}
 \text{Symmetric} \\
 \left[ \begin{array}{cccccccccccccccc}
 \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & \frac{12EI_{yy}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{12EI_{yy}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_{yy}}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_{zz}}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_{zz}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & -\frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_{zz}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & -\frac{12EI_{yy}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_{yy}}{l^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{l} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_{yy}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_{zz}}{l^2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_{yy}}{l} & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_{zz}}{l} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_{yy}}{l} & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_{zz}}{l}
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

但し、Aは梁要素の断面積、Eは縦弾性係数、Gは横弾性係数、lは梁要素の長さ、I<sub>yy</sub>、I<sub>zz</sub>、Jは断面二次モーメントである。なお、I<sub>yy</sub>は、y軸方向の曲げ、I<sub>zz</sub>はz軸方向の曲げ、Jは梁の軸周りねじりについての断面二次

モーメントである。マトリクスにおいて、「Symmetric」とは対称行列であることを意味している。上式により、梁要素はトラスと異なることが明確に理解できる。梁要素は6軸の剛性を持つのに対して、トラスは1軸の剛性を持つのみなので、トラスの利用の際にはモデル化に多くの制約が生じてしまうことになる。本実施形態では、トラスではなく梁要素を用いて結合することで、より自由度の高い、所定の制約条件を満足する最適の形を生成することができる。

## 【0023】

剛性マトリクスKを作成した後、設計変数に関するKの感度を算出する(S103)。最も簡単な例としては、断面を中実円と仮定して、設計変数を断面積とした場合である。なお、この場合は、断面の主軸方向は決定されない。設計変数は、具体的には梁要素12の正規化された断面積 $\rho$  ( $0 \leq \rho \leq 1$ )であり、断面積Aとの間には、

## 【数2】

$$A = \rho A_{\max}$$

の関係がある。ここで、 $A_{\max}$ は最大値であり、 $\rho$ は最終的に0か1の値を有する。正規化された断面積 $\rho$ を用いるのは、計算を容易とするためである。設計変数 $\rho$ に関する剛性マトリクスKの感度を求めるには、Kに関する $\rho$ の微分値を求めればよい。梁要素12の断面を直径dの円と仮定すると、

## 【数3】

$$I_{yy} = I_{zz} = \frac{\pi}{64} d^4 = \frac{\rho^2 A_{\max}^2}{4\pi}$$

## 【数4】

$$J = \frac{\pi}{32} d^4 = \frac{\rho^2 A_{\max}^2}{2\pi}$$

の関係があるから、

## 【数5】

$$\frac{\partial A}{\partial \rho} = A_{\max}$$

【数 6】

$$\frac{\partial I_y}{\partial \rho} = \frac{\partial I_z}{\partial \rho} = \frac{\rho A_{\max}^2}{2\pi}$$

【数 7】

$$\frac{\partial J}{\partial \rho} = \frac{\rho A_{\max}^2}{\pi}$$

となる。これらの式を用いることで、剛性マトリクス  $K$  の設計変数  $\rho$  に関する感度を算出することができる。

【0 0 2 4】

剛性マトリクス  $K$  の感度を算出した後、釣り合い方程式  $f = K u$  を  $u$  について解く (S 1 0 4)。具体的には、外力  $f$  に剛性マトリクス  $K$  の逆行列  $K^{-1}$  を乗じることによって  $u$  を解くことができる。 $u$  を算出した後、次に平均コンプライアンスと体積制約、及びこれらの感度を算出する (S 1 0 5)。平均コンプライアンスとは、具体的には目標関数であり、最適化を行うための目標となる関数である。剛性最大化問題においては、通常  $f \cdot u$  が目標関数に決定され、 $f \cdot u$  を最小化することにより最大剛性が得られることが知られている。 $f$  は境界条件として与えられた外力であり、 $u$  は S 1 0 4 にて算出されているから、これらの値を用いて  $f \cdot u$  を算出することができる。また、体積制約については、境界条件で与えることができ、例えば設計領域の初期体積を 1 0 0 % とした場合、2 0 % の体積制約 (1 0 0 % を 2 0 % に減少させる) を与えることができる。体積制約は、重量制約とすることもできる (1 0 0 k g を 2 0 k g に抑える)。平均コンプライアンスの感度に関しては、

【数 8】

$$f = f \cdot u = u^T K u$$

の関係にあるから、 $f \cdot u$  の感度、すなわち  $f \cdot u$  についての設計変数  $\rho$  の微分値は

【数 9】

$$\frac{\partial f}{\partial \rho} = -u^T \frac{\partial K}{\partial \rho} u$$

となる。ここで、 $T$ は転置を意味し、剛性マトリクス $K$ の感度についてはS 1 0 3の処理で既に算出されているから、この感度を用いることで $f \cdot u$ の感度を算出することができる。体積制約の感度についても、体積についての設計変数 $\rho$ の微分を算出することで求めることができる。

【0 0 2 5】

平均コンプライアンスと体積制約及びこれらの感度を算出した後、これらの値を用いて最適化手法により設計変数 $\rho$ を更新して最適化する（S 1 0 6）。最適化手法には、公知の方法を用いることができ、例えばSLP（逐次線形計画法）やCOLIN（逐次凸関数近似法の一手法）を用いることができる。最適化アルゴリズムは、目標関数である $f \cdot u$ を最小化する問題を解くことであり、平均コンプライアンス $f \cdot u$ の $\rho$ に対する感度及び体積感度を考慮しつつ $f \cdot u$ を最小とする $\rho$ を算出するアルゴリズムである。具体的には、感度が高い梁要素1 2に対しては、その断面積を増大させ、感度が低い梁要素1 2に関しては断面積を減少させ、もしくは断面積を0として実質的にその梁要素1 2を消失させる。感度の低い梁要素1 2を実質的に消失させることで体積が減少し、体積制約を満たすことができる。以上の最適化を行った後、収束したか否か（最小解が得られたか）を判定し（S 1 0 7）、収束しない場合にはS 1 0 2～S 1 0 6の処理を繰り返す、すなわち梁要素1 2の断面積を変更して $f \cdot u$ の値を検証し、最小解が得られない場合には再び梁要素1 2の断面積を変更して最適化を行う。

【0 0 2 6】

図3には、図1に示された構造に対して以上述べた処理を行うことで最適化した場合の形が示されている。感度の高い梁要素1 2のみが剛性最適化された形、すなわちここでは断面積が拡大された形で残り、感度の低い梁要素1 2は実質的に消失し、所定の境界条件下（拘束条件、外力、体積制約）において最も剛性の高い形が得られている。梁要素1 2の断面積の大小は図において線の太さで表現されており、線が太い梁要素1 2ほど断面積が大きいことを示している。このよ

うな形を初期設計形状として用い、後は必要に応じて F E M により詳細な解析を行うことができる。F E M により解析を行う場合でも、図 3 に示された初期形状は力学的に合理的な形状であるため、収束も早く計算時間も短時間で済むことになる。

## 【 0 0 2 7 】

ここで、上述の説明では、最も単純な例として、梁要素 1 2 の断面を中実円とし、その断面積を  $\pi d^2/4$  と仮定した。ここで、 $d$  は断面の直径である。しかし、梁要素 1 2 として、より複雑な形状を取り扱うことが好適である。

## 【 0 0 2 8 】

1 つの梁の断面に  $k$  個の設計変数を設定した場合を考える。各設計変数を  $x_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ )、その設計変数の最大値を  $x_{\max i}$  とする。さらに、その設計変数  $x_i$  を正規化した値（設計変数） $\rho_i$  を用いて、

## 【数 1 0】

$$x_i = x_{\max i} \rho_i$$

と表す。ここで、 $\rho_i$  は、

## 【数 1 1】

$$0 \leq \rho_i \leq 1$$

である。

## 【 0 0 2 9 】

最適化の過程においては、この  $\rho_i$  を設計変数に置き換え最適解を求める。さらに、断面形状が 2 つの主軸方向に関して、対称でない場合には、目標関数を最小化するような主軸方向を決定する必要がある。ここでは、主軸方向の全体座標からの相違を回転角度  $\theta$  で表し、最適な回転角度も決定する。

## 【 0 0 3 0 】

目標関数  $f$  には、上述の場合と同様に次式の平均コンプライアンスを用いる。すなわち、構造物に作用される加重ベクトルを  $f$ 、そのときの変位ベクトルを  $u$  として、上述の数 8 と同様に、

【数 1 2】

$$f = f \cdot u = u^T K u$$

と表される。

【0 0 3 1】

一方、目標関数  $f$  は、正規化した値（設計変数） $\rho_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ) と回転角度  $\theta$  の関数であるから、

【数 1 3】

$$f = f(\rho_1, \dots, \rho_k, \theta)$$

とも表される。

【0 0 3 2】

ここで、最適化問題を整理すると、

【数 1 4】

$$\underset{\rho_1, \dots, \rho_k, \theta}{\text{minimize}} \quad f = f \cdot u = u^T K u$$

となる。

【0 0 3 3】

ここで、制約条件

【数 1 5】

$$\begin{aligned} V &= V(\rho_1, \dots, \rho_k) \leq V^U \\ 0 &\leq \rho_i \leq 1 \text{ for } i=1, \dots, k \\ K u &= f \end{aligned}$$

ここで、 $V$  は構造物の総体積で、 $V^U$  はあらかじめ設定最多体積の制約である。

【0 0 3 4】

次に、 $\Lambda$ ,  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  をラグランジュ未定乗数とし、次式で示すラグランジェアン  $L$  を定義して、



【数 1 6】

$$L = f + \Lambda(V - V^u) + \lambda_1(-\rho_i) + \lambda_2(\rho_i - 1)$$

KKT条件求めると、次のようになる。

【0 0 3 5】

【数 1 7】

$$\frac{\partial L}{\partial \rho_i} = \frac{\partial f}{\partial \rho_i} + \Lambda \left( \frac{\partial V}{\partial \rho_i} \right) - \lambda_1 + \lambda_2 = -u^T \frac{\partial K}{\partial \rho_i} u + \Lambda \left( \frac{\partial V}{\partial \rho_i} \right) - \lambda_1 + \lambda_2 = 0$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = \frac{\partial f}{\partial \theta} = -u^T \frac{\partial K}{\partial \theta} u = 0$$

$$\Lambda(V - V^u) = 0$$

$$\lambda_1(-\rho_i) = 0$$

$$\lambda_2(\rho_i - 1) = 0$$

$$\Lambda \geq 0$$

$$\lambda_1 \geq 0$$

$$\lambda_2 \geq 0$$

$$V - V^u \leq 0$$

$$-\rho_i \leq 0$$

$$\rho_i - 1 \leq 0$$

以上の式を満足する設計変数  $\rho_i$  を求めれば最適解が得られる。しかし、ここでは、設計変数  $\rho_i$  については、前述の断面積を設計変数にした場合と同様に公知の方法を用いることができる。他方設計変数  $\theta$  については、式(11)が成り立つような解を求めることにより最適解を得る。なお、上述の最適化手法においては、目標関数  $f$  と制約条件の設計変数  $\rho_i$  に関する感度を求める必要があるが、目標関数の感度は、数9と同様に、

【数 1 8】

$$\frac{\partial f}{\partial \rho_i} = -u^T \frac{\partial K}{\partial \rho_i} u$$

として求められる。ここで、 $K$ は構造物全体の剛性マトリクスであり、この式は、数9と $\rho$ が複数ある点のみが異なる。すなわち、この例では、設計変数が  $i$  個

あるため、それぞれの設計変数についての感度を求めることになる。

【 0 0 3 6 】

次に、本発明が適用可能な 4 種類の具体的な断面形状を図 4 に示す。図 4 ( a ) は楕円断面、図 4 ( b ) は長方形断面、図 4 ( c ) は長方形中空断面、図 4 ( d ) は C 型断面である。

【 0 0 3 7 】

例えば、図 4 ( a ) の楕円断面の場合には、梁の断面積  $A$ 、 $y$  軸方向の断面二次モーメント  $I_y$ 、 $z$  軸方向の断面二次モーメント  $I_z$ 、ねじりについての極断面二次モーメント  $J$  は、

【数 1 9】

$$\begin{aligned} A &= \frac{\pi}{4} x_1 x_2 \\ I_z &= \frac{\pi}{64} x_1^3 x_2 \\ I_y &= \frac{\pi}{64} x_1 x_2^3 \\ J &= \frac{\pi}{32} \frac{x_1^3 x_2^3}{x_1^2 + x_2^2} \end{aligned}$$

となる。

【 0 0 3 8 】

これらの梁の断面積  $A$ 、 $y$  軸方向の断面二次モーメント  $I_y$ 、 $z$  軸方向の断面二次モーメント  $I_z$ 、ねじりについての極断面二次モーメント  $J$  を用いれば、梁要素の剛性マトリクス  $K_e$  は、 $K_{ep}$  と、 $R$  を用いて、

【数 2 0】

$$K_e = R^T K_{ep} R$$

として求められる。

【 0 0 3 9 】

ここで、 $K_{ep}$  と、 $R$  は、

【数 2 1】

$$K_{ep} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_x}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{AE}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & -\frac{6EI_z}{L^2} & 0 & \frac{12EI_z}{L^3} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{12EI_y}{L^3} & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{12EI_y}{L^3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{2EI_y}{L} & 0 & 0 & 0 & \frac{6EI_y}{L^2} & 0 & \frac{4EI_y}{L} & 0 \\ 0 & \frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_x}{L} & 0 & -\frac{6EI_x}{L^2} & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_x}{L} \end{bmatrix} \quad \text{Symmetric}$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos\theta & \sin\theta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix}$$

である。

【0 0 4 0】

例えば、図4の様に、2つの設計変数を用いた場合には、2つの設計変数  $x_1$  ,  $x_2$  を前述の場合と同様に、正規化された設計変数  $\rho_1$  ,  $\rho_2$  を用いて、

【数 2 2】

$$x_1 = x_{\max 1} \rho_1$$

$$x_2 = x_{\max 2} \rho_2$$

と表して、 $A$ 、 $I_y$ 、 $I_z$ 、 $J$ の $\rho_1$ 、 $\rho_2$ それぞれに関する感度を求めれば、梁の剛性マトリクスの設計変数に関する感度である $K$ の $\rho_1$ による偏微分と、 $K$ の $\rho_2$ による偏微分を求めることができ、数 1 8 を用いて目標関数  $f$  の感度を求めることができる。そして、この感度から上述と同様にして最適化計算を行い、最適解を得る。

【0 0 4 1】

また、梁要素の回転角度  $\theta$ （梁要素座標系に対する断面主軸の角度）の更新値は、 $KKT$ 条件から導出される、

【数 2 3】

$$u_e^T \frac{\partial K_e}{\partial \theta} u_e = 0$$

より求める。この目標関数  $f$  の設計変数  $\theta$  による偏微分の式は、 $\theta$  に関する正弦、余弦の多項式になるので、 $\theta$  の値は一般的な数値計算手法により求めることができる。

【0 0 4 2】

すなわち、上述の数 2 0 から  $K_e$  を求めると、

【数 2 4】

$$\begin{array}{c}
 \text{Symmetric} \\
 \left[ \begin{array}{cccccccc}
 \frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 \\
 0 & \frac{12EI_2}{L^3} & \frac{12EI_{12}}{L^3} & 0 & \frac{6EI_{12}}{L^2} & \frac{6EI_2}{L^2} & 0 & \frac{12EI_2}{L^3} \\
 0 & \frac{12EI_{12}}{L^3} & \frac{12EI_1}{L^3} & 0 & \frac{6EI_1}{L^2} & \frac{6EI_{12}}{L^2} & 0 & \frac{12EI_{12}}{L^3} \\
 0 & 0 & 0 & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_{11}}{L} & \frac{4EI_{12}}{L} & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{4EI_{12}}{L} & \frac{4EI_2}{L} & 0 & 0 \\
 -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 \\
 0 & -\frac{12EI_2}{L^3} & \frac{12EI_{12}}{L^3} & 0 & -\frac{6EI_{12}}{L^2} & \frac{6EI_2}{L^2} & 0 & \frac{12EI_2}{L^3} \\
 0 & \frac{12EI_{12}}{L^3} & \frac{12EI_1}{L^3} & 0 & \frac{6EI_1}{L^2} & \frac{6EI_{12}}{L^2} & 0 & \frac{12EI_{12}}{L^3} \\
 0 & 0 & 0 & -\frac{GJ}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{2EI_{11}}{L} & \frac{2EI_{12}}{L} & 0 & \frac{2EI_{12}}{L} \\
 0 & \frac{6EI_{12}}{L^2} & \frac{6EI_1}{L^2} & 0 & \frac{2EI_1}{L} & \frac{2EI_{12}}{L} & 0 & \frac{6EI_{12}}{L^2} \\
 0 & \frac{6EI_2}{L^2} & \frac{6EI_{12}}{L^2} & 0 & \frac{2EI_{12}}{L} & \frac{2EI_2}{L} & 0 & \frac{6EI_2}{L^2}
 \end{array} \right]
 \end{array}$$

となる。

【0 0 4 3】

ここで、 $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_{12}$ は、

【数 2 5】

$$I_1 = \frac{1}{2}(I_y + I_z) + \frac{1}{2}(I_y - I_z) \cos 2\theta$$

$$I_2 = \frac{1}{2}(I_y + I_z) - \frac{1}{2}(I_y - I_z) \cos 2\theta$$

$$I_{12} = \frac{1}{2}(I_y - I_z) \sin 2\theta$$

である。

【0 0 4 4】

従って、K e についての感度は、



【数 2 7】

$$I_s = \left( I_y \quad -I_z \right) \sin 2\theta = -\frac{\partial I_1}{\partial \theta} = \frac{\partial I_2}{\partial \theta}$$

$$I_c = \left( I_y \quad -I_z \right) \cos 2\theta = \frac{\partial I_{12}}{\partial \theta}$$

である。

【0 0 4 5】

また、要素変位ベクトル  $u_e$  を

【数 2 8】

$$u_e = \left\{ u_{1x} \quad u_{1y} \quad u_{1z} \quad \theta_{1x} \quad \theta_{1y} \quad \theta_{1z} \quad u_{2x} \quad u_{2y} \quad u_{2z} \quad \theta_{2x} \quad \theta_{2y} \quad \theta_{2z} \right\}^T$$

とすれば、数 2 3 は、

【数 2 9】

$$\begin{aligned} u_e^T \frac{\partial K_e}{\partial \theta} u_e &= \frac{4D}{L^3} \{ C_1 I_c + C_2 I_s \} \\ &= \frac{4D}{L^3} \left\{ C_1 \left( I_y \quad -I_z \right) \cos 2\theta + C_2 \left( I_y \quad -I_z \right) \sin 2\theta \right\} \\ &= \frac{4D}{L^3} \left( I_y \quad -I_z \right) \{ C_1 \cos 2\theta + C_2 \sin 2\theta \} = 0 \end{aligned}$$

となる。ここで、 $C_1$ 、 $C_2$  は、



【数 3 0】

$$\begin{aligned}
C_1 = & -6u_{1y} u_{1z} + 6u_{1y} u_{2z} + 6u_{1z} u_{2y} - 6u_{2y} u_{2z} \\
& + 3Lu_{1y} \theta_{1y} + 3Lu_{1y} \theta_{2y} - 3Lu_{1z} \theta_{1z} - 3Lu_{1z} \theta_{2z} \\
& - 3Lu_{2y} \theta_{1y} - 3Lu_{2y} \theta_{2y} + 3Lu_{2z} \theta_{1z} + 3Lu_{2z} \theta_{2z} \\
& + 2L^2 \theta_{1y} \theta_{1z} + L^2 \theta_{1z} \theta_{2y} + L^2 \theta_{1y} \theta_{2z} + 2L^2 \theta_{2y} \theta_{2z}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_2 = & 3u_{1y}^2 - 6u_{1y} u_{2y} - 3u_{1z}^2 + 3u_{2y}^2 + 6u_{1z} u_{2z} - 3u_{2z}^2 \\
& + 3Lu_{1z} \theta_{1y} - 3Lu_{2z} \theta_{1y} - 3Lu_{2y} \theta_{1z} + 3Lu_{1z} \theta_{2y} \\
& - 3Lu_{2z} \theta_{2y} - 3Lu_{2y} \theta_{2z} + 3Lu_{1y} \theta_{1z} + 3Lu_{1y} \theta_{2z} \\
& + L^2 \theta_{1z}^2 - L^2 \theta_{1y} \theta_{2y} - L^2 \theta_{1y}^2 - L^2 \theta_{2y}^2 + L^2 \theta_{1z} \theta_{2z} + L^2 \theta_{2z}^2
\end{aligned}$$

である。

【0 0 4 6】

従って、最適な回転角度  $\theta$  は、以下の手順で求められる。まず、 $I_y = I_z$  であれば、断面は 2 軸に対して対称となり、回転角度は決定できない。そこで、 $I_y \neq I_z$  であると仮定する。

【0 0 4 7】

そして、 $C_2 = 0$  であれば、 $\cos 2\theta = 0$  であり、 $\theta = -\pi/4$  または  $\pi/4$  である。

【0 0 4 8】

一方、 $C_2 \neq 0$  であれば、 $\tan 2\theta = -C_1/C_2$  から解を得る。

【0 0 4 9】

なお、いずれの場合についても解は 2 つ以上得られる。それらの解の十分条件は、

【数 3 1】

$$\frac{\partial^2 L}{\partial \theta^2} = \frac{\partial^2 l}{\partial \theta^2} = -\frac{8D}{L^3} (I_y - I_z) \{-C_1 \sin 2\theta + C_2 \cos 2\theta\} > 0$$

であり、これを評価することにより、決定できる。

【0 0 5 0】

このようにして、楕円の場合において、回転角度  $\theta$  を求めることができる。従

って、梁の主軸方向を決定することができ、最適化の段階で、梁のレイアウトだけでなく、梁の断面設計も行うことができる。

#### 【 0 0 5 1 】

図 5 には、本実施形態の設計方法を自動車ボディに適用した場合の例が示されている。図 5 は、自動車ボディの設計領域を複数の節点 1 0 と梁要素 1 2 で構成した設計モデルである。

#### 【 0 0 5 2 】

また、図 6 には、図 5 の設計モデルに対して境界条件のうち固定条件として右側を拘束し、外力として左側に負荷を与えた場合の例が示されている。(A) は上面視において図中左上から負荷を与えた場合であり、(B) は上面視において左下から荷重を与えた場合である。これらの荷重が別々に付加された場合（いわゆるマルチローディング）に変位が最小となるような最適の剛性を得る。

#### 【 0 0 5 3 】

図 7 には、図 5 の設計モデルに対して図 6 のような境界条件を与え、図 2 に示された処理フローチャートに従って最適化を行った結果が示されている。図 3 と同様に、剛性に関して感度の低い梁要素 1 2 は実質的に消失し、感度の高い梁要素 1 2 のみが残し、合理的な初期形状が得られている。

#### 【 0 0 5 4 】

なお、本発明の設計方法は自動車ボディや建造物の骨格構造のような全体構造に限定されず、例えばボディ骨格の接合部のような部分構造にも適用することができる。

#### 【 0 0 5 5 】

図 8 には、本発明の設計方法を適用することができる部分構造の一例が示されており、自動車ボディにおける接合部 2 0 の初期形状を生成することができる。

#### 【 0 0 5 6 】

図 9 には、接合部 2 0 の設計モデルが示されており、図 1 や図 5 と同様に多数の節点及びこれら節点同士を結合する梁要素で構成されている。

#### 【 0 0 5 7 】

図 1 0 には、図 2 に示された処理フローチャートに従って所定の境界条件下で

図 9 の設計モデルを最適化した結果が示されている。感度の低い、不要な梁要素が実質的に消失し、各梁要素の剛性（すなわち断面積）を最適化した形状が得られている。図 1 0 に示された形状を初期形状とし、F E M などを用いてさらに詳細解析を行うことも可能である。

#### 【 0 0 5 8 】

以上、本発明の実施形態について説明したが、例えば自動車ボディの場合には設計範囲外にパネルが存在し、このパネルが設計領域の形状に剛性を付与するため、自動車ボディの設計においては、このパネルによる剛性寄与分を考慮して形を最適化するのも好適である。パネルによる剛性寄与分は設計領域における節点の属性として付与し、剛性が付与された節点と梁要素を用いて最適化を行うことで、パネルを考慮した剛性最適化形状を得ることができる。

#### 【 0 0 5 9 】

また、本実施形態においては最適化の例として剛性最大化について説明したが、この他に固有振動数の最適化（振動周波数が最も高くなるような形状）や柔軟性の最適化にも同様に適用することができる。設計変数に対する梁要素の感度を算出し、この感度を考慮しつつ設計変数を変更して最適化を図ればよい。

#### 【 0 0 6 0 】

##### 【発明の効果】

以上説明したように、本発明によれば合理的な初期設計形状を自動作成することができ、効率的な開発が可能となる。

##### 【図面の簡単な説明】

- 【図 1】 実施形態の設計モデルの構成図である。
- 【図 2】 実施形態の処理フローチャートである。
- 【図 3】 図 1 の設計モデルを最適化した場合の結果を示す説明図である。
- 【図 4】 断面形状の具体的例を示す図である。
- 【図 5】 自動車ボディの設計モデル図である。
- 【図 6】 図 5 の自動車モデルに対し負荷される荷重説明図である。
- 【図 7】 図 5 の自動車ボディを最適化したモデル説明図である。
- 【図 8】 設計対象となる接合部の説明図である。

【図 9】 図 8 に示された接合部の設計モデル図である。

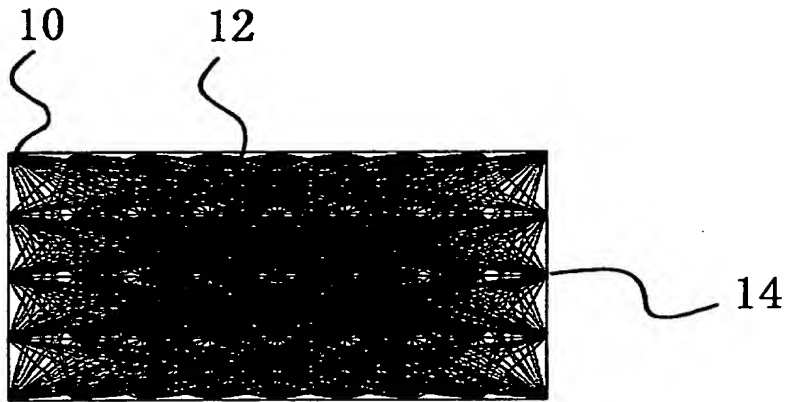
【図 1 0】 図 9 の設計モデルを最適化したモデル図である。

【符号の説明】

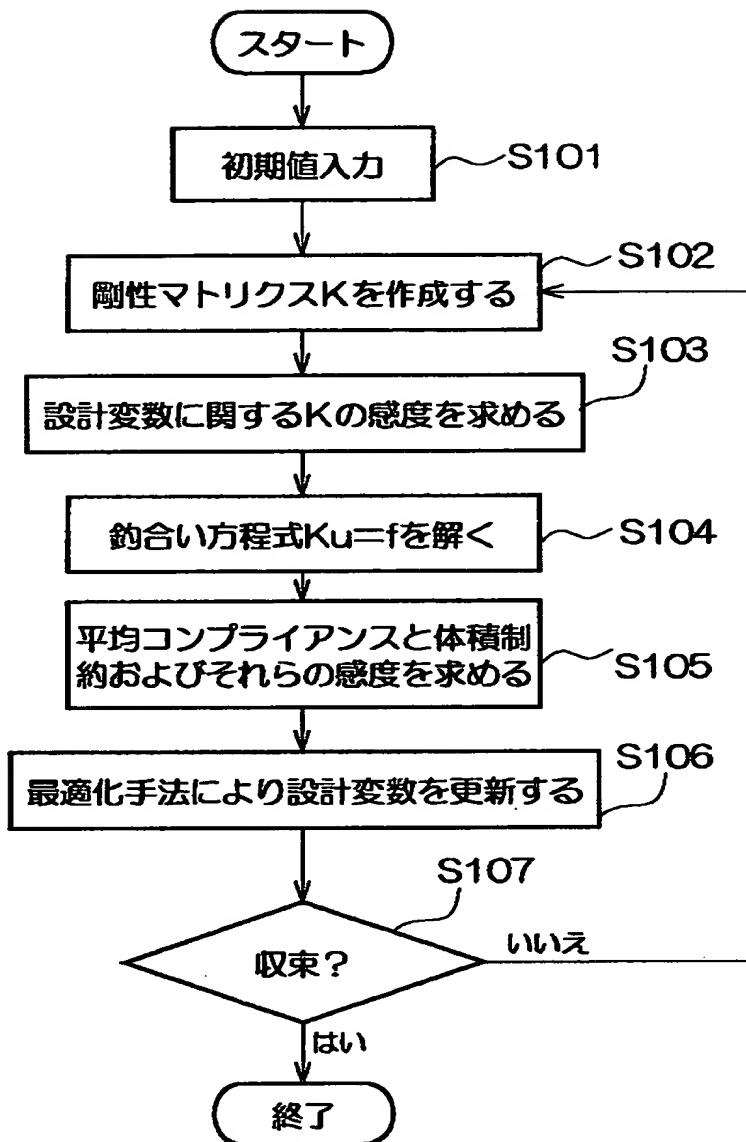
1 0 節点、1 2 梁要素。

【書類名】 図面

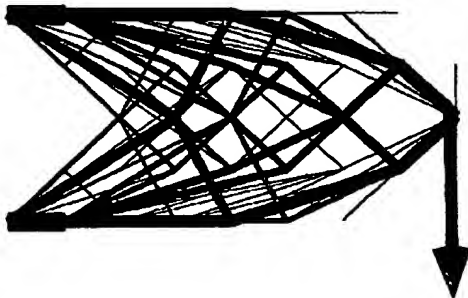
【図 1】



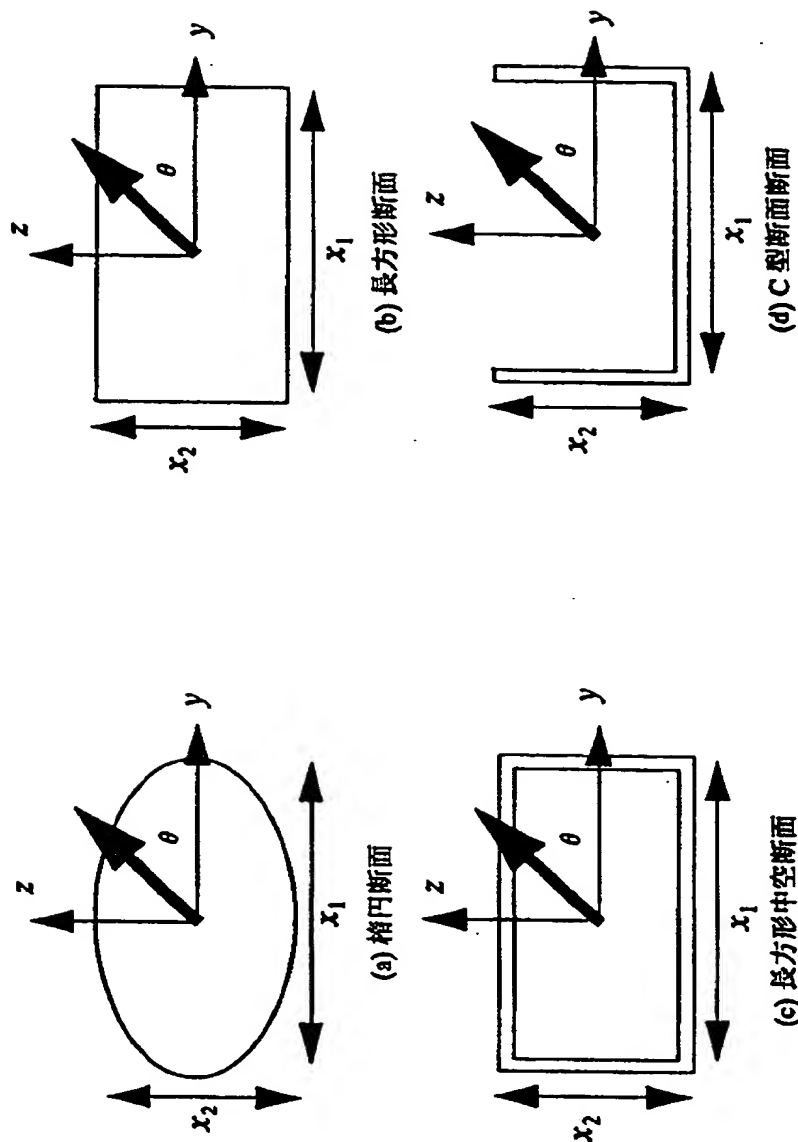
【図 2】



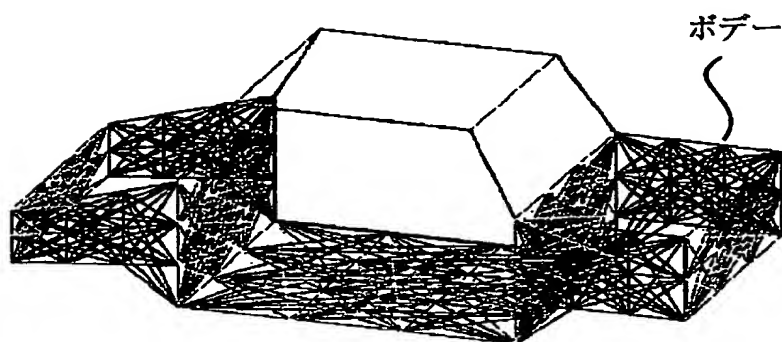
【図 3】



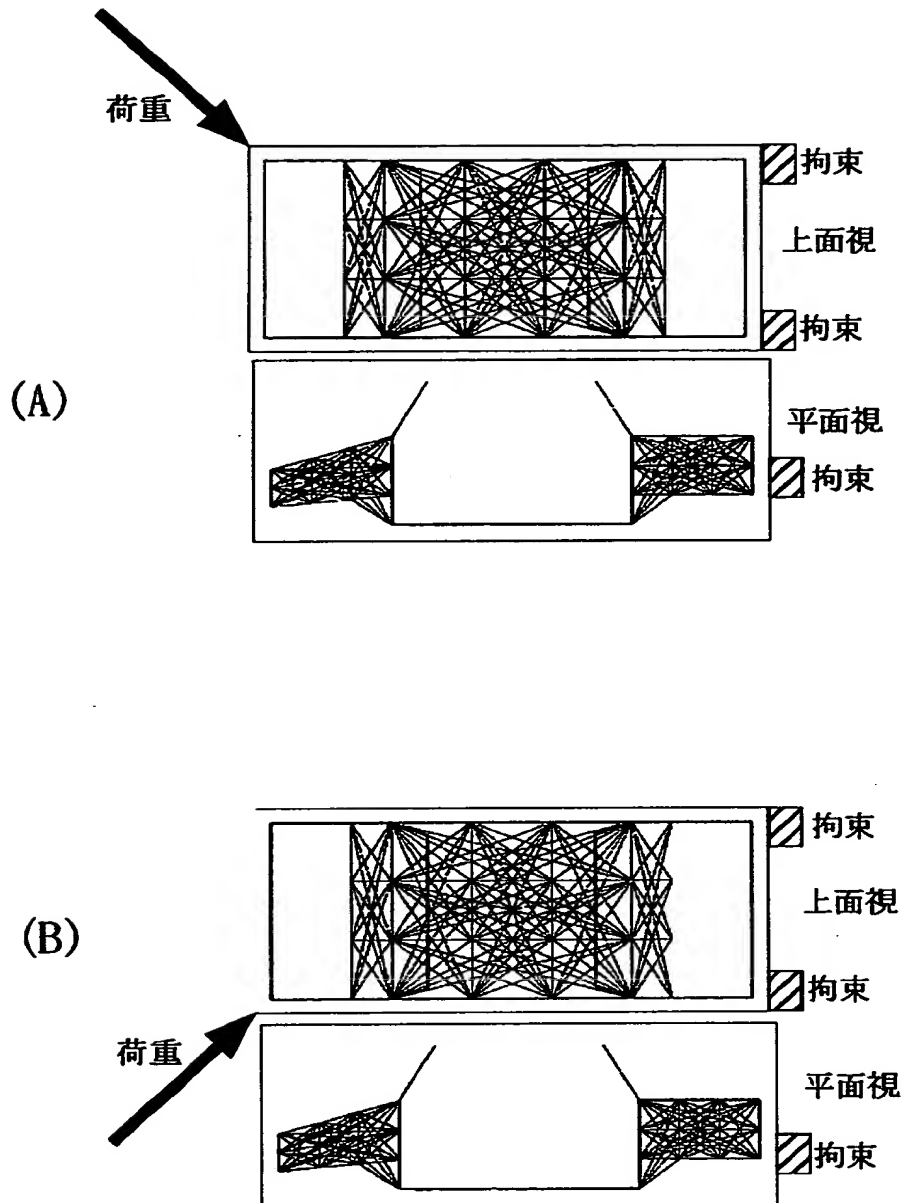
【図 4】



【図 5】

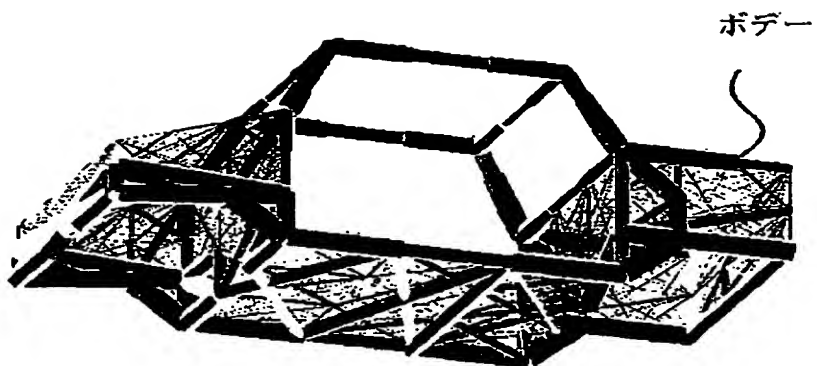


【図 6】

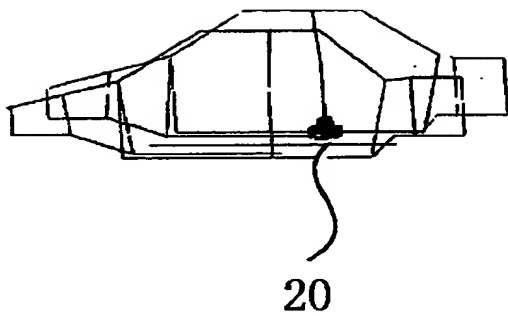




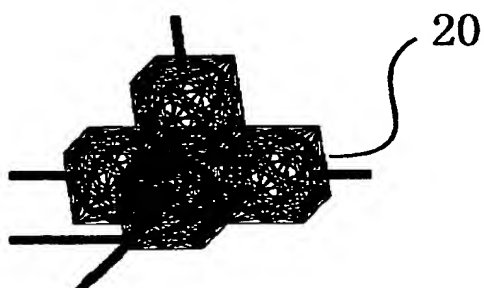
【図 7】



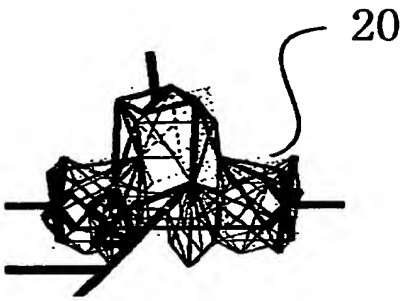
【図 8】



【図 9】



【図 1 0】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 初期設計段階で形を生成することのできる設計方法を提供する。

【解決手段】 設計対象の設計領域を複数の節点 1 0 で分割し、隣接する節点同士及び非隣接節点同士を梁要素 1 2 で結合する。節点 1 0 及び梁要素 1 2 から構成される設計モデルに対して最適化を行い、初期設計形状を得る。剛性最大化の場合、剛性マトリクスの感度を算出し、感度の高い梁要素については断面積等の寸法値を増大させ、感度の低い梁要素に関しては寸法値を減少あるいは 0 として実質的に消失させる。複数の梁要素を用いて設計モデルを構成することで、境界条件に合致した合理的な形状を得ることができる。

【選択図】 図 1

【書類名】 手続補正書

【整理番号】 TC1-0480

【提出日】 平成12年10月30日

【あて先】 特許庁長官殿

【事件の表示】

【出願番号】 特願2000-321622

【補正をする者】

【識別番号】 000003609

【氏名又は名称】 株式会社豊田中央研究所

【代理人】

【識別番号】 100075258

【弁理士】

【氏名又は名称】 吉田 研二

【電話番号】 0422-21-2340

【手続補正 1】

【補正対象書類名】 特許願

【補正対象項目名】 発明者

【補正方法】 変更

【補正の内容】

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株  
式会社豊田中央研究所内

【氏名】 西脇 眞二

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株  
式会社豊田中央研究所内

【氏名】 西垣 英一

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株

式会社豊田中央研究所内

【氏名】 菊池 昇

【発明者】

【住所又は居所】 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道4 1 番地の1 株  
式会社豊田中央研究所内

【氏名】 鶴見 康昭

【その他】 発明者の順序の変更（発明者の記載内容の変更なし）

【プルーフの要否】 要

出 願 人 履 歴 情 報

識別番号 [000003609]

1. 変更年月日 1990年 9月 6日  
[変更理由] 新規登録  
住 所 愛知県愛知郡長久手町大字長湫字横道41番地の1  
氏 名 株式会社豊田中央研究所